

**Experimentelle Untersuchungen
zu den Grundlagen
des zahnärztlichen Präzisionsgusses**

von
Peter Strauß
aus
Karlsruhe

1968

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der prothetischen Abteilung
(Vorstand: Prof. Dr. Dr. H. Paschke)
der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkranke
(Direktor: Prof. Dr. Dr. G. Steinhardt)
der Universität Erlangen-Nürnberg

Experimentelle Untersuchungen zu den Grundlagen des zahnärztlichen Präzisionsgusses

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Peter Strauß
aus
Karlsruhe

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Professor Dr. E. Wetterer

Referent: Priv. Doz. Dr. L. Kobes

Correferent: Professor Dr. Dr. H. Paschke

Tag der mündlichen Prüfung: 26.2.68

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit

gewidmet.

I N H A L T

A Einleitung und Problemstellung

B Theoretische Grundlagen der Versuche

- a) Mögliche Formen der Strömung im Gußkanal
- b) Die Strömungsgeschwindigkeit
- c) Der Durchmesser des durchströmten Rohres
- d) Die Zähigkeit des flüssigen Metalls

C Eigene Untersuchungen

- a) Mechanischer Teil
- b) Elektrischer Teil
- c) Dokumentierender Teil

Problematik und Grenzen der Methode

- a) Elektrische Grenzen
- b) Chemische Grenzen
- c) Mechanische Grenzen

D Versuchsergebnisse

E Diskussion

F Zusammenfassung

G Schrifttum

A EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Seit TAGGART (24) 1907, der als Begründer der zahnärztlichen Gußtechnik angesehen wird, seine neue Methode des Druckgusses veröffentlichte, sind zwar die Gußmethoden ausgebaut und verfeinert worden, aber auch heute spricht man doch immer noch vom Gußproblem. Es ist selbst nach sechzig Jahren noch nicht gelungen, gewisse Imponderabilien in der Gußtechnik auszumerzen, die auch bei dem Geübtesten einen bestimmten Prozentsatz an Fehlgüssen erstehen lassen.

So stehen wir also vor dem Problem, wie sich Blasen und Kontraktionsdefekte vermeiden oder einschränken lassen. Dieses Problem ist außerordentlich vielschichtig. Da müßten z.B. die Fragen nach der optimalen Gußtemperatur der Metallschmelze und nach dem Einfluß der in der Hohlform befindlichen Luft auf das einströmende Metall beantwortet werden.

Auch ist noch nicht geklärt, in welcher Form die Metallschmelze durch den Gußkanal in die Hohlform fließt.

Gerade diese letzte Problemstellung ist nicht unwichtig, weil bestimmte Zusammenhänge zwischen der Strömung im Gußkanal und dem Porengehalt des Werkstückes vermutet und nachgewiesen wurden (VOSS 26). Es schien deshalb notwendig, Grundlagen über Strömungsvorgänge im Gußkanal in bezug auf das weitverbreitete Schleudergußsystem zu erarbeiten, was in der vorliegenden Arbeit versucht wurde.

Als erster hat SOUDER (23) 1933 versucht, etwas über die Größenordnung der Zeit auszusagen, in der der zahnärztliche Guß nach der Luftdruckmethode abläuft. Er fotografierte das in die Hohlform der Muffel einfließende Metall durch ein Muffelfenster aus Quarzglas und stellte bei einem Gießdruck von 10 psi (lb/square inch) fest, daß viele zahnärztliche Güsse nur eine zehntel Sekunde oder weniger in Anspruch nehmen.

Weitere Versuche, um festzustellen, welche Zeit das flüssige Metall beim Druckgußverfahren benötigt, die Form zu füllen, wurden von HERBERT und THOMPSON (8) 1937 und von MYERS und PFEIFFER (13) 1940 unternommen. Sie verwendeten für ihre Messungen einen elektrischen Schaltkreis, der durch das flüssige Metall in seiner Spannung verändert wurde. Das Ergebnis wurde auf einen Kymographen aufgezeichnet. Die Messungen ergaben ähnliche Werte wie oben.

(Für die notwendigen Vorversuche benutzten MYERS und PFEIFFER (13) Quecksilber, weil wiederholte Versuche mit der gleichen Muffel gemacht werden konnten. Für die Hauptversuche wurde eine zahnärztliche Edelmetalllegierung verwandt).

1941 führte MYERS (12) weitere Versuche durch, um entsprechende Ergebnisse für den Schleuderguß zu erhalten. Die hierbei entstehende Schwierigkeit, den elektrischen Impuls von der mit der Schleuder rotierenden Muffel zum Meßgerät zu übertragen, überwand er durch den Kontakt einer mit der Schleuder rotierenden Kohlebürste mit einer an den Fuß der Schleuder montierten Messingscheibe.

Für die Zeit, die das Metall braucht, um bis zum Eingang des Gußkanals zu gelangen, erhielt er einen Durchschnittswert von 0,12 sec und für die gesamte Gießzeit gelangte er zu Werten zwischen 0,38 und 0,67 sec.

Mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen machte DRESNER (4) Beobachtungen über das Einströmen von flüssigem Metall in die Hohlform. Für seine Versuche diente ihm Quecksilber, wobei er allerdings spezifische Eigenschaften dieses Metalls ausklammerte. Die zum Gießen notwendige Energie gewann er dadurch, daß er das Metall aus 1 m Höhe in einer Glasröhre auf die Gußmulde auftreffen ließ.

Über die Strömung im Gußkanal selbst beobachtete er (S.32) einen nicht randständigen Strahl, dessen Umfang erst durch den Rückstau aus der Gußform mit der Kanalwand identisch wurde.

Beim Einfließen des Metalls in die Hohlform konnte er das Entstehen von Wirbeln und dadurch bedingte Luft-einschlüsse erkennen.

KYSELOVA, KYSELA und MARES (10) haben nach den Versuchen von MYERS (12) sowie MEYRS und PFEIFFER (13) die Reynolds-schen Zahlen für die Strömung im Gußkanal errechnet. Nach ihrem Ergebnis ist die Strömungsform des flüssigen Metalls im Gußkanal beim Schleuderguß laminar, während sie bei der Druckgußmethode turbulent ist.

VOSS (26) geht in seiner Arbeit von der Vermutung aus, daß es sich bei der beim Schleuderguß durch den Gußkanal fließenden Schmelze um einen tropfigen Strahl handelt. Er leitet seine Vermutung von ähnlichen Verhältnissen beim industriellen Gußverfahren ab (27). Auf Grund dieser Vermutung kommt er durch logische Überlegung zu einem speziellen Kanalsystem. Dieses erweist sich bei Probegüssen unter anderen Kanalsystemen in puncto Porenfreiheit als das Beste.

B THEORETISCHE GRUNDLAGEN DER VERSUCHE

a) MÖGLICHE FORMEN DER STRÖMUNG IM GUSSKANAL

Die physikalischen Grundlagen für die folgenden Abschnitte wurden nach BLASIUS (1), PRANDTL (16), RÜDEL (17), ROTTA (19), SCHLICHTING (20), SCHLICHTING (21) und WILLE (30) erarbeitet. Definitionen, wie z.B. laminar und turbulent werden in Übereinstimmung mit diesen Werken gehandhabt.

Ein strömendes Medium wird nach laminaren oder turbulenten Verhältnissen klassifiziert. REYNOLDS hat diese Klassifizierung mit seiner nach ihm benannten Reynoldsschen Gleichung in eine mathematisch fassbare Form gebracht. Er setzte die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v , eine vergleichbare geometrische Größe, z.B. Rohrdurchmesser d und die kinematische Zähigkeit des strömenden Mediums ν in ein bestimmtes Verhältnis und erhielt dadurch eine

dimensionslose Zahl, mit deren Hilfe sich verschiedene Strömungsverhältnisse vergleichen lassen: die sog. Reynoldssche Zahl.

Die Definition der Reynoldsschen Zahl lautet:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (I)$$

Für Werte von $Re < 2000$ bleibt die laminare Struktur der Strömung stabil. Für Strömungsverhältnisse mit $2000 < Re < 3000$ stellte ROTTA (19) einen wesentlichen Einfluß sog. Störungsfaktoren fest (z.B. Einlauf ins Rohr, Unregelmäßigkeiten der Rohrwand, mechanische Erschütterungen usw). Durch solche Faktoren kann es zur Entstehung von sog. Turbulenznestern kommen, die mit der Stärke und Dauer der Störungsfaktoren, mit steigender Reynoldsscher Zahl und auch mit dem Verhältnis Rohrlänge durch Rohrdurchmesser in ihrer räumlichen Ausdehnung und in ihrer Frequenz zunehmen. Es handelt sich hierbei um eine Übergangsform zwischen laminarer und turbulenter Strömung.

Bei der Entstehung von Turbulenz steigt der Widerstand im Rohr und damit sinkt die Durchflußmenge und die Fließgeschwindigkeit. Also nimmt auch der Wert für die Reynoldssche Zahl ab. D.h.: denselben äußeren Verhältnissen müssen je nach Auftreten von turbulenter oder laminarer Strömung verschiedene Reynoldssche Zahlen zukommen.

Bei $Re > 3000$ läßt sich die hier instabile laminare Strömung nur noch durch große Störungsfreiheit aufrecht erhalten. Extreme Werte bis $Re = 40\,000$ sind erreicht worden. (20) Als stabil wird die turbulente Strömungsform angesehen.

Betrachtet man die Strömungsverhältnisse im Gußkanal rein theoretisch, so muß noch ein weiterer Gesichtspunkt hinzutreten: es darf nicht vorausgesetzt werden, daß der Gußkanal in jedem Falle von einem randständigen Metallstrom ausgefüllt wird.

Für den Tiegelguß ist denkbar, daß der Querschnitt der

Tiegelöffnung (DEGUSSA Kohletiegel: $d = 2 \text{ mm}$, $f = 3,14 \text{ mm}^2$) geringer ist, als der Querschnitt des Gußkanalsystems. In diesem Falle gibt der Tiegel weniger Metall ab, als das Kanalsystem schlucken kann.

Im laminaren Strömungsbereich würde es sich hier um einen freien, zusammenhängenden, zylindrischen Strahl handeln, während bei Reynoldsschen Zahlen von 2000 an, je nach Größe der Störungsfaktoren an der Öffnung des Kohletiegels, die Oberfläche des Strahls immer mehr von ihrer ursprünglichen Zylinderform abweicht und es erfahrungsgemäß bald zum Abschleudern von tropfenförmigen Teilen kommt. Die Metallschmelze würde in diesem Falle als tropfiger Strahl durch den Gußkanal fließen (VOSS 26). (Das läßt sich sehr schön an einem normalen Wasserhahn beobachten).

Wenn eine im Rohr strömende Flüssigkeit ins Freie tritt, kommt es zur Änderung des Geschwindigkeitsprofils. Das Geschwindigkeitsprofil, das die Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Längsschnitt darstellt, ändert sich mit der auf die Grenzschicht, d.h. die äußerste Schicht der Strömung einwirkenden Haftspannung (Adhäsionskraft).

Bei der benetzenden und auch bei der nicht benetzenden Flüssigkeit ist die Haftspannung so groß, daß die Geschwindigkeit der Grenzschicht gleich Null ist (ERK 5).

Bei einem gedachten Flüssigkeitsstrahl im Vakuum wirkt auf die Grenzschicht keine Haftspannung, sondern nur die Schubspannung der Flüssigkeit. Demnach ist die Geschwindigkeit der Grenzschicht gleich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Praktisch gelten diese Verhältnisse auch für Flüssigkeiten in Luft, weil die Grenzschicht hierbei nicht von der Flüssigkeit sondern von der Luft gebildet wird.

Die Änderung des Geschwindigkeitsprofils eines Flüssigkeitsstrahls beim Verlassen des Rohres zeigt Abb.1. Auf die Form des Strömungsübergangs (A - B) wurde nicht eingegangen.

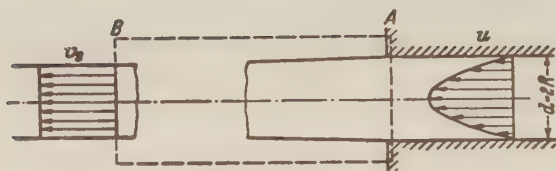


Abb.1. Änderung des Geschwindigkeitsprofils beim ausfließenden Flüssigkeitsstrahl (n. ROTTA 19)

Eine weitere theoretische Überlegung ist unter diesen Gesichtspunkten interessant. Allgemeingut ist die Vermutung, daß das durch den Gußkanal fließende Metall nach dem sog. Wasserstrahlpumpenprinzip Gas aufnehmen kann, das dann später in Form von Poren und Blasen das Gußstück beeinträchtigen kann. Die Gase können einerseits in Lösung gehen (SCHOENBECK 22) und andererseits ungelöst, d.h. als Blasen mitgerissen werden (Wasserstrahlpumpe).

Ein Maß für die Aufnahmekapazität von Gasen ist in erster Linie die Geschwindigkeit des fließenden Mediums.

Ein physikalisches Grundgesetz (HAGEN-POISEUILLE) stellt die Relation von Druck und Geschwindigkeit in der Strömung dar. Danach nimmt mit wachsender Geschwindigkeit der Druck ab. Selbst bei der einfachsten Strömungsform im Gußkanal, dem randständigen laminaren Strom, treten also schon Druckunterschiede auf. Dadurch ist es nicht ausgeschlossen, daß Luft durch den Druckunterschied aus der Einbettmasse in das fließende Metall gelangen kann.

Bei der turbulenten Strömung ist dann die Gasaufnahme wesentlich intensiver, da sich hier der Druckabfall mit der zweiten Potenz der Geschwindigkeit ändert.

Ganz extrem dürfte die Gasaufnahme des tropfigen Strahls sein, denn es handelt sich ja bereits um ein Gemisch aus Flüssigkeit und Gas.

Schließlich muß noch auf eine besondere Form der laminaren und auch der turbulenten Strömung eingegangen werden, auf

den Wirbel. Wirbel können an geometrischen Unregelmäßigkeiten entstehen, z.B. an Kanten, Düsen o.ä. Laminare Wirbel gehen bei steigender Reynoldsscher Zahl schon sehr früh durch die sie erzeugenden Störfaktoren in die turbulente Strömungsform über.

Aus der Reynoldsschen Gleichung erkennen wir, daß für die Strömungsform des flüssigen Metalls im Gußkanal folgende Faktoren bestimmend sind:

- b) die Strömungsgeschwindigkeit
- c) der Durchmesser des durchströmten Rohres
- d) die Zähigkeit des flüssigen Metalls.

b) DIE STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEIT

Beim Prinzip der halbautomatischen Rotationsschleuder wird in erster Linie die Trägheit des flüssigen Metalls gegen die Steigerung der Winkelgeschwindigkeit für den Gußvorgang ausgenutzt (während der Dauer, in der die Schleuder durch die Federkraft beschleunigt wird). In zweiter Linie ist es die Zentrifugalbeschleunigung, die mit steigender Drehzahl zunimmt und nach Aussetzen der Federkraft, wenn die optimale Drehzahl erreicht ist, ausschließlich wirkt.

Die Beschleunigungskräfte ändern sich während der ersten drei Umdrehungen, soweit die Schleuder aufgezo-gen worden ist. Damit ändert sich auch die Geschwindigkeit des flüssigen Gußmaterials.

Zu Beginn des Gußvorganges hat die Schmelze die Geschwindigkeit Null, desgleichen auch zum Schluß, wenn die Hohlform gefüllt und das Material erstarrt ist. Zwischen diesen beiden Nullwerten muß es aber zwangsläufig zu einem zuerst ansteigenden und nach dem Geschwindigkeitsmaximum wieder abfallenden Wert für die Funktion der Geschwindigkeit kommen.

Mit den Mitteln, die für die Versuche zur Verfügung standen,

läßt sich eine solche Funktion nicht definieren. Wohl aber wurde in erster Linie versucht, festzustellen, in welchen Bereichen sich das Geschwindigkeitsmaximum bewegt, um dann mit Hilfe der Reynoldsschen Gleichung Rückschlüsse auf die Strömungsform zu ziehen.

Wenn nämlich dieses Maximum unterhalb einer Reynoldsschen Zahl von 2000 liegt, dann kann festgestellt werden, daß der zahnärztliche Schleuderguß unter den gegebenen Voraussetzungen in laminarer Form abläuft.

Erreicht das Maximum aber Werte über 2000, dann besteht die Vermutung, daß je nach Höhe desselben und Ausmaß der Störungsfaktoren über gewisse zeitliche Abschnitte des Gusses eine mehr oder weniger turbulente Strömung auftritt. (Einschränkung s. Problematik).

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt: als Gegenkraft gegen die obigen Beschleunigungskräfte wirkt neben dem Widerstand, den das Gußkanalsystem der durchfließenden Flüssigkeit entgegensetzt, die Oberflächenspannung des flüssigen Metalls. Sie verhindert ein Eindringen in Kapillaren, wird aber schon durch sehr geringe Kräfte überwunden. OEHRLEIN (14) stellte bei seinen Versuchen für einen Gußkanaldurchmesser von 1 mm eine zum Guß notwendige Kraft von nicht einmal 0,5 p fest. Sobald das Metall in den Gußkanal eingedrungen ist, hat die Oberflächenspannung keine Bedeutung mehr. Ein Einfluß auf die Strömung findet also nicht statt (WETTERER 29).

c) DER DURCHMESSER DES DURCHSTRÖMTEN ROHRES

Für die Versuche wurde davon ausgegangen, daß heute für größere Güsse Kanäle mit einem Durchmesser von 3 mm empfohlen werden (MARX 11, WINDECKER und HERMANN 31). Eine weitere Voraussetzung der Versuche ist die zylindrische Form des Gußkanals und eine möglichst glatte Wand desselben.

d) DIE ZÄHIGKEIT DES FLÜSSIGEN METALLS

Die kinematische Zähigkeit ν wird dargestellt durch das

Verhältnis der dynamischen Zähigkeit η zur Flüssigkeitsdichte ρ .

Es gilt:
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (II)$$

Die Berechnungen dieser Arbeit werden im MKS - System durchgeführt. Danach erhält man folgende Benennungen:

$$[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$[\eta] = \frac{\text{N} \cdot \text{sec}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{sec} \cdot \text{m}}$$

$$[\nu] = \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

η wird meist in einer Größe des CGS - Systems, dem P (Poise) oder cP (Zentipoise) angegeben. In der Umrechnung gilt:

$$1 \text{ P} = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{sec} \cdot \text{m}}$$

Für die Berechnungen, die für die Versuche notwendig waren, dienten die Werte für einen gedachten Guß mit 24-karätigem Gold bei einer Gießtemperatur von 1100°C als Standard. Hierfür waren exakte Werte der Zähigkeit und der Dichte in der Literatur zu finden (s.u.). Diese Werte liegen in der Größenordnung einfacher, für den zahntechnischen Guß verwendbarer Goldlegierungen.

Die dynamische Zähigkeit beträgt für Feingold 5,13 cP (GEBHARDT und WÖRWAG 6) und das spezifische Gewicht wird mit $17,24 \text{ g/cm}^3$ angegeben (KRAUSE und SAUERWALD 9).

Für die Versuche selbst wurde statt Gold Quecksilber benutzt. Quecksilber bietet mehrere Vorteile:

- aa) Es können mehrere Güsse mit derselben Muffel durchgeführt werden (MYERS und PFEIFFER 13).
- bb) Das Gußmetall braucht nicht erhitzt und die Temperatur dementsprechend nicht eingestellt zu werden. Fehler durch Temperaturdifferenzen fallen weg, denn es wird bei einer einheitlichen Raumtemperatur (20°C) gegossen.

cc) Eine exakte mathematische Umrechnung in die vergleichbaren Verhältnisse für den Goldguß ist möglich.

Nachteile durch das Quecksilber: s. Problematik.

Für Quecksilber bei 20°C waren folgende Werte zu finden:

spezifisches Gewicht: 13,546 g/cm³ (GMELIN 7)

dynamische Zähigkeit: 1,554 cP (D'ANS und LAX 2).

Nach Gleichung (II) erhält man für die kinematische Zähigkeit:

bei Gold (1100°C): $0,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$

bei Quecksilber (20°C): $0,115 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$

Da diese Werte differieren, müssen sie mit anderen, manipulierbaren Größen der Reynoldsschen Gleichung ausgeglichen werden, um bei dem Versuch mit Quecksilber möglichst weitgehend gegenüber Goldguß identische Strömungsverhältnisse zu erlangen.

Von den Faktoren der Reynoldsschen Gleichung ist in diesem Falle am leichtesten der Durchmesser des durchströmten Rohres zu verändern.

Dafür gilt die folgende Berechnung:

Für Au gelte die Gleichung: $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$ (I)

Für Hg gelte die Gleichung: $Re' = \frac{v' \cdot d'}{\nu'}$

Für den zu errechnenden Gußkanaldurchmesser wird gefordert, daß sowohl Re mit Re', als auch v mit v' identisch sind.

Dann gilt die Gleichung: $d' = \frac{d \cdot \nu'}{\nu}$ (III)

Damit haben wir ein einfaches Verhältnis des Gußkanaldurchmessers zur kinematischen Zähigkeit.

Wenn nun für Goldgußversuche ein Kanaldurchmesser von 3 mm angenommen wird, dann ergibt sich nach der Gleichung für die entsprechenden Quecksilberversuche ein Durchmesser von 1,15 mm.

C EIGENE UNTERSUCHUNGEN

a) MECHANISCHER TEIL

Für die Gießversuche wurde eine DEGUSSA - Tiegelgußschleuder verwandt, die ca fünf Jahre lang Studenten zur Verfügung stand. Die Schleuder wurde für jeden Versuch drei Umdrehungen aufgezogen.

Ein Dokument über die Beschleunigungsfunktion der ersten drei Umdrehungen der Schleuder wurde mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen geschaffen (Vorschlag von Zeitlupenaufnahmen: DEGUSSA 3).

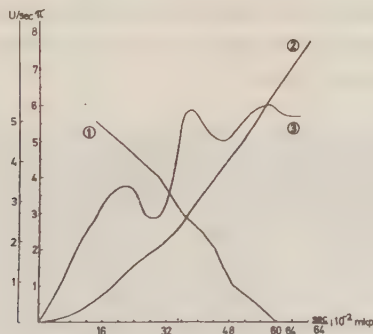


Abb.2. Drehmoment und Beschleunigung
der Schleuder

Kurve 1: Verlauf des Drehmoments (M , 10^{-2} mkp). Die Messung wurde mit einer Federwaage durchgeführt ($\pm 5\%$).

Kurve 2: Weg - Zeit Diagramm (π , $\frac{\text{sec}}{64}$).

Kurve 3: Drehzahl der Schleuder (gemessen an der Schleuderachse) in Abhängigkeit von der Laufzeit (erste Ableitung von Kurve 2).

Der wellenförmige Verlauf kommt durch das Pendeln des beweglichen Schleuderarmes zustande.

Dieser Arm beginnt nach $18/64$ sec vorzulaufen. Er durchläuft nach $30/64$ sec die 180° Stellung. Der Vorlauf endet erst bei einem Winkel von 220° in der $33/64$ sec. Anschließend pendelt der Arm wieder zurück, bis er nach $43/64$ sec einen Winkel von 130° erreicht hat.

Die Pendelbewegung erfolgt in einer gedämpften Schwingung, die nach einer Sekunde annähernd abgeklungen ist.

Der Kohletiegel wurde mit farblosem Lack imprägniert, um eine Verunreinigung des Quecksilbers mit Kohlestaub zu vermeiden. (Die Öffnung des Kohletiegels wurde nicht erweitert, was bei Goldgußversuchen mit einem Kanaldurchmesser von 3 mm geschehen müßte, s.o.)

Zur Messung der Geschwindigkeit mit Hilfe eines elektrischen Stromkreises wurden drei Elektroden verwendet. Die Elektroden wurden in eine gelochte Muffel (Hersteller: Fa. K. Keil, Nördlingen) installiert. Die Löcher in der Muffel bieten den Vorteil, daß die Elektroden einfach angelegt und ebenso einfach vermessen werden können. Die Vermessung erfolgte mit einer Schublehre auf 0,1 mm genau. (Das entspricht bei einem Elektrodenabstand von 15 mm einer Toleranz von $\pm 0,67\%$).

Als Form für den Gußkanal diente ein gerader Stahldraht von 1,2 mm Durchmesser. Das bedeutet, für den Goldguß umgerechnet, einen Kanaldurchmesser von 3,132 mm. Einige weitere Versuche wurden mit einem Gußkanal von 0,8 mm, entsprechend (Au): 2,088 mm durchgeführt.

Die Muffel wurde auf einem Einbettgerät (DEGUSSA) für kalottenförmige Eingußtrichter für die Versuche präpariert. Der den Gußkanal formende Stahldraht verlief durch die Längsachse der Muffel und die Elektroden wurden mit leichter Spannung daran angelegt. Dadurch wurde für den Versuch eine möglichst punktförmige Elektrode erzielt und das Kanallumen durch die in der Flucht der Wand liegende Elektrode nicht beeinträchtigt. Während der Versuche lagen die Elektroden senkrecht zur Unterlage.

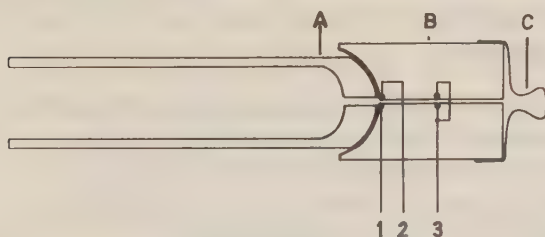


Abb.3. Schnittzeichnung durch den Kohletiegel A, die Muffel B und die Gummiblase C, in der das flüssige Quecksilber aufgefangen wurde. Die Position der Elektroden (1), (2) und (3) ist schematisch eingezeichnet.

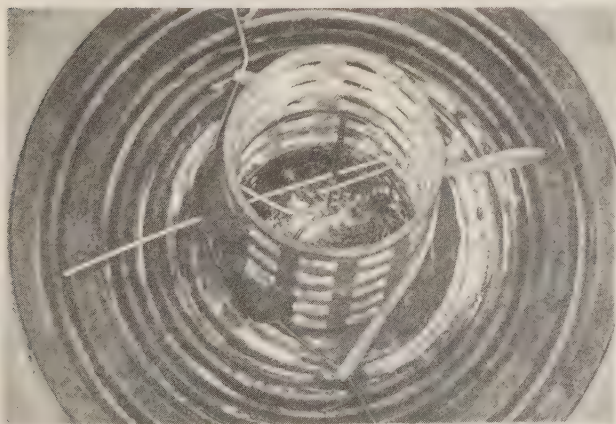


Abb.4. Muffel mit Elektroden auf dem Einbettgerät.

Es wurde darauf geachtet, daß die Versuchsbedingungen möglichst wenig geschwindigkeitsmindernde Faktoren enthielten, um an das für den entsprechenden Gußkanal mögliche Geschwindigkeitsmaximum weitestgehend heranzukommen. Aus diesem Grunde wurde das flüssige Metall hinter der Muffel in einem flexiblen Hohlraum (Teil eines Luftballons) aufgefangen. Dadurch wurde vermieden, daß das Metall durch gestaute Luft gebremst werden konnte.

Die Einbettmasse (DC Cristobalit Einbettmasse BAYER Leverkusen) wurde im vorgeschriebenen Mischungsverhältnis sorgfältig blasenfrei verarbeitet, um einen möglichst glatten Gußkanal zu erhalten.

Wie es sich zeigte, wurden die ersten Versuchsergebnisse durch die Feuchtigkeit der Einbettmasse in nachteiliger Weise beeinflusst (s.u.). Dieser Nachteil konnte durch vierstündiges Trocknen der Muffel in einem Heißluftschrank (MEMMERT) bei 60°C behoben werden.

Mit der Anordnung der Elektroden in der Muffel läßt sich die Geschwindigkeit des flüssigen Metalls durch zwei verschiedene Methoden errechnen.

Nach der Methode A) erhalten wir die Geschwindigkeit, mit der die Spitze der Metallschmelze durch den Gußkanal fließt, während die Methode B) nur die Errechnung einer Durchschnittsgeschwindigkeit für den gesamten Gußvorgang zuläßt.

Für die Geschwindigkeit gilt die Gleichung:

$$v = \frac{s}{t} \quad (IV)$$

Die Benennungen sind: $[v] = \frac{m}{sec}$

$$[s] = m$$

$$[t] = sec$$

A) s ist durch den Elektrodenabstand in der Muffel gegeben. t ist die Zeitspanne, die das Metall be-

nötigt, um von dem Elektrodenpaar (1) - (2) bis zur Elektrode (3) zu gelangen.

B) s ist hier die Länge einer fiktiven, durch den Gußkanalquerschnitt geformten Metallsäule.

Es gilt die Gleichung:

$$s = \frac{G}{\rho \cdot f} \quad (V)$$

Die Benennungen sind:

$[G] = \text{kg}$ (Gewicht der Versuchsmenge Hg)

$[\rho] = \text{kg/m}^3$ (Dichte von Hg)

$[f] = \text{m}^2$ (Querschnitt des Gußkanals)

t ist die Dauer des Kontaktes der Elektroden (1) und (2).

v läßt sich nach Gleichung (IV) errechnen.

Das Quecksilber wurde vor und nach jedem Versuch gewogen. Der durchschnittliche Verlust betrug für den Versuch ca 5 Milligramm.

Die Versuchsmengen lagen für den einzelnen Guß zwischen ca 2 und ca 4 Gramm.

b) ELEKTRISCHER TEIL

Als Elektrodenmaterial diente rostfreier Stahldraht (WIPLA). Die Elektroden wurden von Quecksilber nicht benetzt, wie der Vorversuch ergab. (Es wurde ein Probestück des Elektrodenmaterials mit Quecksilber über eine Zeitspanne von 24 Stunden in direkten Kontakt gebracht. Eine makroskopische Änderung an der Oberfläche des Drahtes war nicht zu erkennen. Auch das Gewicht des Probestückes blieb auf 10^{-4} Gramm genau gleich).

Mit den Elektroden der Muffel wurde eine dreiadrigte Litze verlötet, die zum elektrischen Schaltkreis (s.u.) führte.

Um die Rotationsbewegung beim Schleudervorgang aufzu-

fangen, wurde die Litze in der Rotationsachse der Schleuder befestigt und von dort zu einem Aufhängepunkt an der Decke geführt. Diese Methode bietet gegenüber der Methode von MYERS (12), der den elektrischen Impuls über einen Schleifkontakt übertrug, den Vorteil des geringeren technischen Aufwandes und des zuverlässigeren elektrischen Kontaktes. Darüber hinaus können mehrere verschiedene Impulse entsprechend der Zahl der Verbindungsadern zu gleicher Zeit übertragen werden. Der Nachteil dieser Leitung besteht darin, daß nach jedem Versuch die Litze entwirbelt werden muß.

(Aus diesem Grunde wurde in die Litze eine dreipolige Kupplung eingebaut. Sie wurde im Rotationszentrum an der Schleuder befestigt.)

Der elektrische Schaltkreis bietet die Möglichkeit, durch Kurzschließen der Elektroden, was durch das im Gußkanal befindliche Metall geschieht, die elektrische Spannung zu variieren.

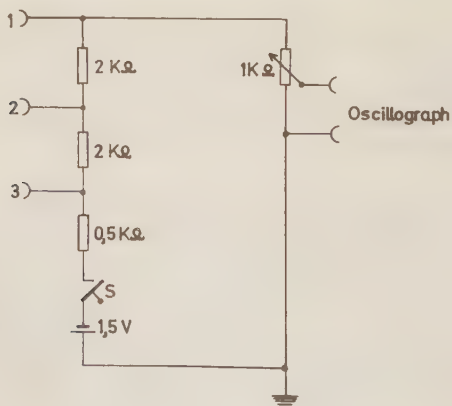


Abb. 5. Elektrischer Schaltplan (Entwurf: E. WETTERER)

Die durch die Vorgänge in der Muffel veränderte Spannung wurde durch einen Kathodenstrahloszillographen in einer zeitabhängigen Funktion aufgezeichnet. Der Oszillograph hat gegenüber anderen, für diesen Zweck auch geeigneten Geräten (z.B. Kymograph) den Vorteil, daß der veränderliche, anzeigende Teil, der Kathodenstrahl praktisch keine Masse besitzt und deshalb bei den Messungen eine Trägheit des Zeigers nicht überwunden werden muß. Es handelt sich hier um ein ungedämpftes System, das keine Eigenschwingung hat und deshalb extrem kurzzeitige Messungen ermöglicht.

Als Oszillograph wurde das Gerät HM 112 der Fa. K. Hartmann KG, Frankfurt/Main benutzt. (Es wurde lebenswürdigerweise vom Physiologischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg zur Verfügung gestellt).

Bei diesem Gerät ist eine Triggerschaltung möglich, wobei ein nur einmal über die Röhre wandernder Strahl erzeugt werden kann. Dieser Strahl kann zu einem, durch den Beginn eines bestimmten elektrischen Impulses genau definierten Zeitpunkt ausgelöst werden.

Für einen Teil der Versuche wurde ein solcher Impuls dadurch erzeugt, daß zu Beginn der Schleuderbewegung der elektrische Schaltkreis durch ein Relais eingeschaltet wurde.

Bei dem Gerät HM 112 ist mit der Triggerschaltung ein maximaler Bereich von 0,3 sec zu erfassen. Es hat sich leider gezeigt, daß dieser Meßbereich in vielen Fällen nicht ausreichend war.

c) DOKUMENTIERENDER TEIL

Die fluoreszierende Röhre des Oszillographen wurde im abgedunkelten Raum fotografisch festgehalten (EXAKTA, Bl.4, 2min., 17/10 DIN). Durch die Belichtungszeit von zwei Minuten wurde einerseits die Gittereinteilung der Röhre sichtbar, während andererseits der einmal durch-

laufende Lichtpunkt den Film ebenso ausreichend belichtete.

Zur Eichung wurde auf jede Aufnahme eine 50 Hz - Wechselstromkurve aufgenommen. Die Spannung wurde über einen Transformator aus dem Lichtnetz entnommen.

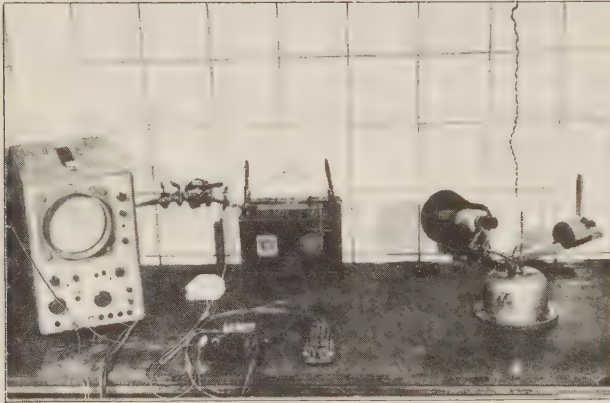


Abb.6. Aufbau der für die Versuche benötigten Geräte.
V. l. n. r.: Oszillograph, elektrischer Schaltkreis, Relais, Schleuder mit Muffel, im Hintergrund: Transformator, Akkumulator 12 V (für den Relaisstromkreis).

PROBLEMATIK UND GRENZEN DER METHODE

a) ELEKTRISCHE GRENZEN

- 1) Die Verzögerung der Relaischaltung wurde nicht berücksichtigt.
- 2) Die Zeiteichkurve mit 50 Hz aus dem Lichtnetz besitzt eine Toleranz von $\pm 0,5 \%$ (Auskunft der Stadtwerke Erlangen vom 5.1.68).
- 3) Auf die elektrischen Übergangswiderstände zwischen Elektroden und Quecksilber wurde nicht näher eingegangen. Es darf aber angenommen werden, daß ein

während des Gußvorgangs gleichbleibender elektrischer Übergangswiderstand auf eine gleichförmige Strömung im Bereich der Elektroden schließen läßt.

Für die Themastellung war in der Hauptsache die quantitative Bestimmung (Zeit) des elektrischen Stromflusses notwendig. Qualitativ, d.h. hinsichtlich der Stromspannung wurde nur versucht, Kontaktperioden der Elektroden (1) - (2) und (1) - (2) - (3) zu unterscheiden.

(Exaktere Spannungskurven dürfte man bei einer höheren Ausgangsspannung, ca 100 V, erhalten, WALDMANN 28).

b) CHEMISCHE GRENZEN

Nach ROEMPP (18) ist eine Korrosion von rostfreiem Stahl schon durch eine minimale Quecksilberkonzentration von 1 : 2 000 000 in der Luft möglich. Um Fehler von dieser Seite auszuschalten, wurden die Muffeln nicht länger als zwei Stunden zu Versuchen benützt. Wie oben erwähnt, spielt ein durch eventuelle Korrosion sich ändernder Übergangswiderstand an den Elektroden keine Rolle für das Versuchsergebnis.

c) MECHANISCHE GRENZEN

- 1) Die Oberflächenspannung des flüssigen Metalls wurde ausgeklammert (s.o.).
- 2) Die Erstarrungsexpansion sowie die Oberflächenrauigkeit der Einbettmasse wurde nicht berücksichtigt.
- 3) Desgleichen: der thermische Widerstand (VACHUDA 25), der durch die Temperaturdifferenz zwischen dem flüssigen Metall und der Muffel entsteht. Die Metallschmelze wird während des Einfließens abgekühlt und erhält höhere Viskositätswerte oder es erstarren die äußersten Schichten des Metallstromes und engen dadurch das Gußkanallumen ein. (In beiden Fällen würde entsprechend der Reynoldsschen Gleichung die Reynoldssche Zahl

kleiner werden).

- 4) Auch auf die Möglichkeit der Gasaufnahme durch das flüssige Metall und eventuell damit verbundene Volumenänderungen wird nicht näher eingegangen. (Entsprechend der Reynoldsschen Gleichung könnte die Reynoldssche Zahl hier nur größer werden).
- 5) Die Gußschleuder wurde für jeden Versuch $3 \times 360^\circ = 6\pi$ aufgezogen. Unregelmäßigkeiten müssen aber mit einkalkuliert werden, weil die Auslösung der Schleuder von Hand erfolgte.
- 6) In den berechneten Ergebnissen wurde vorausgesetzt, daß während des Gußvorgangs der ganze Querschnitt des Gußkanals vom flüssigen Metall erfüllt sei. Nehmen wir hypothetisch an, daß das nicht zutrifft, dann müssen die Versuchsergebnisse in ihrem Aussageumfang eingeschränkt werden:

Die nach der Methode A) errechneten Geschwindigkeiten können größer sein, nicht aber kleiner, weil die Elektrode (3) nicht unbedingt von der Spitze des Metallstromes tangiert werden muß, also die gemessene Zeit länger sein kann, als die wirkliche Zeit des Durchflusses.

Für Geschwindigkeiten, die nach der Methode B) errechnet wurden, gilt in dem angenommenen Falle, daß nicht der ganze Querschnitt des Gußkanals vom flüssigen Metall ausgefüllt ist: die reelle Metallsäule im Gußkanal ist länger, als die, die für die Berechnung zugrunde gelegt wird und dadurch kann der Kontakt mit den Elektroden länger erhalten bleiben. Die reelle Geschwindigkeit ist dann größer und der Durchmesser des Metallstromes kleiner als angenommen.

Während der Durchführung der Versuche hat sich herausgestellt, daß exaktere Meßergebnisse erhalten werden können, wenn die Elektroden (1) und (2) direkt in der Vorderkante des Gußkanals liegen. In den Muffeln für

die Versuche 1 - 21 lagen diese Elektroden ca 2 mm kanaleinwärts und für die Versuche 22 - 41 befanden sich die Elektroden in der Position, die in der Schnittzeichnung (Abb.3.) dargestellt ist.

- 7) Wenn für den Gußvorgang ein freier Metallstrahl angenommen wird, so darf die Reynoldssche Gleichung nicht mehr angewandt werden. Sie hat nur Bedeutung für den Fall, daß die Grenzschicht einer Rohrströmung die Geschwindigkeit Null hat. In unserem Falle dann nur für den Austritt aus dem Kohletiegel. Nach dem Ablösen des Strahles von der Wand kommt es zur Beschleunigung der Grenzschicht. Sobald das Metall wieder mit der Kanalwand in Berührung kommt, wird die Grenzschicht wieder abgebremst und es treten wieder Reynoldssche Verhältnisse ein. Die Strömungsform, in der ein nicht querschnittfüllender Metallstrom durch den Gußkanal fließt, ist also nicht exakt zu erfassen.
- 8) Da der vergleichbare Gußkanaldurchmesser für Quecksilber nur das 0,4-fache des Durchmessers beim Goldguß betragen darf, sind den Versuchen in Richtung auf engere Gußkanäle Grenzen gesetzt. (Einzelheiten wurden nicht untersucht).
- 9) Eine weitere Grenze taucht im Hinblick auf die äquivalenten Mengen an Gußmetall auf:

Für die Strömungsgeschwindigkeit des Goldes gelte die Gleichung:

$$v = \frac{V}{t \cdot f} \quad (\text{VI})$$

Für Hg gelte die Gleichung:

$$v' = \frac{V'}{t' \cdot f'}$$

Die Benennungen sind:

$[V] = \text{m}^3$ (Volumen des Metalls)

$[f] = m^2$ (Querschnitt des Gußkanals)

$[v] = m/sec$ (mittlere Strömungsgeschwindigkeit)

$[t] = sec$ (die zum Durchfließen benötigte Zeit)

Als Voraussetzung für Gleichung (III) ist die Geschwindigkeit von Hg und Au gleichgesetzt worden. Um die sich entsprechenden Volumina zu erhalten, muß auch die Durchflußzeit von Hg und Au: t' und t gleichgesetzt werden. Daraus folgt die Gleichung:

$$v = \frac{V' \cdot f}{t \cdot V} \quad (VII)$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich, daß für Rückschlüsse von Hg auf Au ein gegenüber dem Hg-Volumen siebenfach größeres Goldvolumen in Betracht gezogen werden muß. Die äquivalenten Gewichte stehen im Verhältnis:
Hg : Au = 1 : 8,9.

D VERSUCHSERGEBNISSE

Es wurden insgesamt 41 Versuche durchgeführt, wovon 30 ein Ergebnis brachten. Elf Versuche blieben erfolglos oder mißglückten. (Ursachen hierfür: Fehler bei der Manipulation oder technisches Versagen).

Ergebnisse aus der Berechnung nach Methode A):

Nr.	Durchm. $10^{-3}m$	Zeit sec	Geschwindigkeit. m/sec	Re
22	0,8	0,053	0,283	1969
23	0,8	0,04	0,375	2609
24	0,8	0,09	0,166	1155
25	0,8	0,087	0,172	1197
26	0,8	0,14	0,107	744
27	0,8	0,074	0,2	1391

Nr.	Durchm.	Zeit	Geschwindigkeit.	Re
33	1,2	0,06	0,25	2609
34	1,2	0,045	0,333	3474
38	0,8	0,04	0,375	2609

Der Elektrodenabstand war in allen Fällen $15 \cdot 10^{-3}$ m.

Besonders hervorzuheben ist Versuch 38. Er wurde mit einer Muffel durchgeführt, in der das Metall in einem nach distal starr und luftdicht verschlossenen Hohlraum aufgefangen wurde. Es wurde versucht, einen Einfluß der im Hohlraum gestauten Luft auf die Strömungsgeschwindigkeit festzustellen. Ein solcher Einfluß konnte für diesen Versuch nicht festgestellt werden, da die Geschwindigkeit, gemessen am durchschnittlichen Versuchsergebnis, eher zu hoch lag.

Ergebnisse aus der Berechnung nach Methode B):

Nr.	Durchm.	Gewicht	Weg	Zeit	Geschw.	Re
	10^{-3} m	10^{-3} kg	m	sec	m/sec	
4	1,2	3,53	0,23	0,076	3	31300

Beispiel der Berechnung für Versuch 4:

Aus den Werten:

$$\varrho = 13,546 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$f = 36 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \text{ m}^2$$

$$G = 3,53 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

erhalten wir nach Gleichung (V):

$$s = \frac{3,53 \cdot 10^{-3}}{13,546 \cdot 10^3 \cdot 36 \cdot 10^{-8} \cdot \pi}$$

$$s = 0,23 \text{ m}$$

und aus den Werten:

$$s = 0,23 \text{ m}$$

$$t = 0,076 \text{ sec}$$

ergibt die Gleichung (IV):

$$v = \frac{0,23}{0,076}$$

$$v \approx 3 \text{ m/sec}$$

aus:

$$v = 3 \text{ m/sec}$$

$$v = 0,115 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$$

$$d = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

bekommt man nach Gleichung (I):

$$Re = \frac{3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{0,115 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 31300.$$

Für drei Versuchsergebnisse mußte die Methode B) variiert werden, da bei den entsprechenden Versuchen nur die Phase des Kontaktes aller drei Elektroden aufgezeichnet worden war.

(Für diese Variation muß einmal der Abstand des Elektrodenpaares (1) - (2) von der Elektrode (3): $15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ von der errechneten Metallsäule subtrahiert werden).

Nr.	Durchm. 10^{-3} m	Gewicht 10^{-3} kg	Weg m	Zeit sec	Geschwindigkeit. m/sec	Re
13	1,2	2,04	0,118	0,185	0,638	6658
35	1,2	3,97	0,244	0,27	0,9	9391
36	1,2	3,97	0,244	0,285	0,856	8932

Die Geschwindigkeit des Metalls in einem Gußkanal von 1,2 mm Durchmesser beträgt für $Re = 2000$: 0,19 m/sec.

Für den Gußkanaldurchmesser von 0,8 mm ist die entsprechende Geschwindigkeit 0,29 m/sec.

Der Zeitraum vom Beginn des Schleudervorgangs bis zum Anfang der Kontaktkurve betrug im Durchschnitt 0,15 sec. (MYERS (12) erhielt für ähnliche Verhältnisse einen Durchschnittswert von 0,12 sec).

Nach Anlage und Ablauf der Versuche müßte theoretisch die Idealkurve folgendes Bild ergeben:

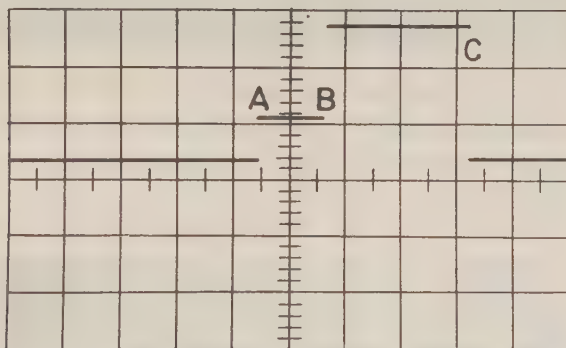


Abb.7. Idealkurve. Strecke AB entspricht dem Kontakt der Elektroden (1) - (2), BC dem Kontakt der Elektroden (1) - (2) - (3).

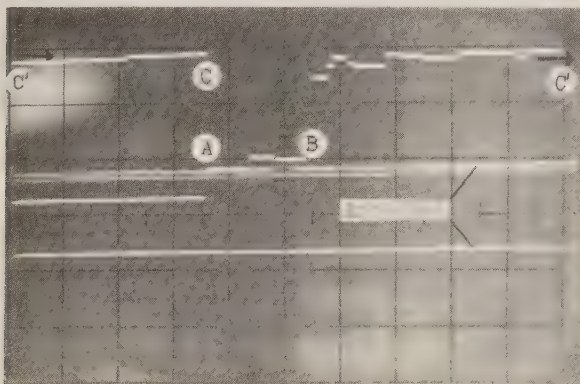


Abb.8. Versuch 22. Hier konnte Strecke AB bestimmt werden. (Das Ergebnis ist durch Retuschieren hervorgehoben).

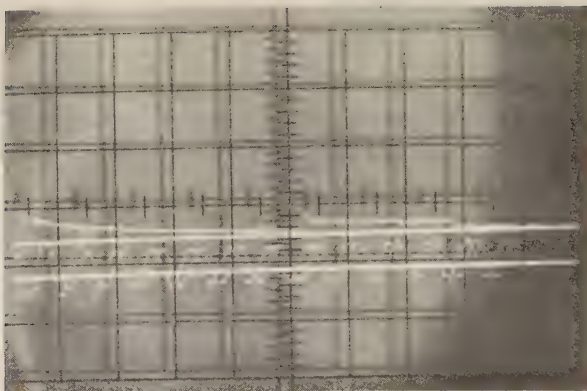


Abb.9. Versuch 4. Kontakt der Elektroden (1) - (2). Der Kurvenbeginn zeigt einen durch die Feuchtigkeit der Einbettmasse bedingten gebogenen Verlauf (s. auch Abb.10.).

(Es besteht Verdacht auf laminare Strömungsform).

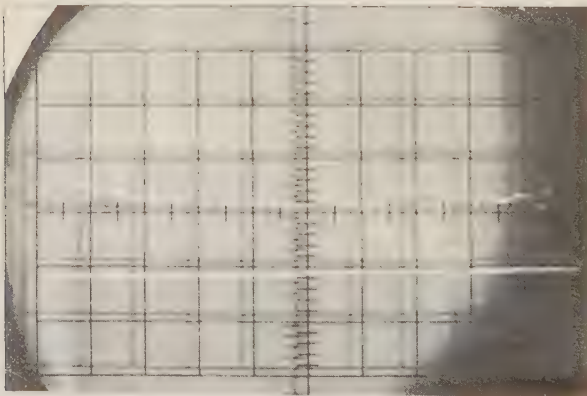


Abb.10. Versuch 3. Die Kurve zeigt einen oft unterbrochenen Verlauf. Das Ergebnis ist nicht zu verwerten für eine Bestimmung der Geschwindigkeit.

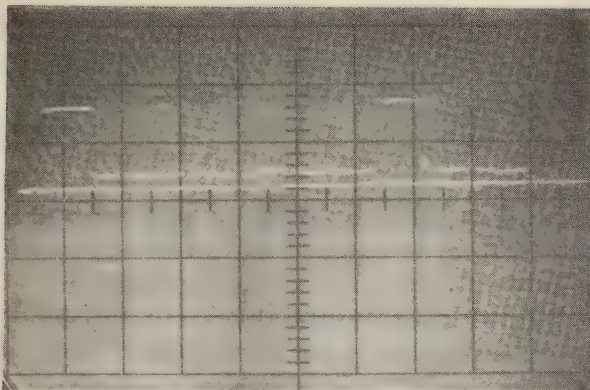


Abb.11. Versuch 35. Es wurde nur Strecke BC dargestellt.

Die nicht beurteilbaren kurven zeigten oft einen sehr unregelmäßigen Verlauf oder die Zeitdauer des elektrischen Impulses ging über den Meßbereich des Oszillographen hinaus.

E DISKUSSION

Aus den durch die mitgeteilten Versuche gewonnenen Ergebnissen geht hervor, daß beim zahnärztlichen Schleuderguß ein turbulenter Metallfluß im Gußkanal durchaus möglich ist.

Als gesichert darf angesehen werden, daß die Anfangsgeschwindigkeit des flüssigen Metalls für den Austritt aus der Öffnung des Kohletiegels noch im laminaren Bereich oder im Übergangsbereich zur turbulenten Strömung liegt.

Wenn der Guß durch einen Gußkanal von 3 mm Durchmesser und mit einem Kohletiegel mit einer Öffnung von 2 mm erfolgt, dann kann die Metallschmelze den Gußkanal nicht über den ganzen Querschnitt füllen. Es handelt sich hier also nicht um eine Rohrströmung im Sinne des Reynoldsschen Gesetzes.

Entscheidend für diesen Fall ist der Austritt der Strömung aus der Tiegelöffnung und weitere Störfaktoren, die in der Gestalt des Gußkanals, im zeitweiligen Kontakt der Strömung mit der Kanalwand, in mechanischen Erschütterungen usw. liegen.

Bei höheren Reynoldsschen Zahlen an der Austrittsöffnung des Kohletiegels kann es durchaus zu einem tropfigen Strahl kommen. (Daran ist besonders bei größeren Güssen zu denken, d.h. bei längerem Einwirken der beschleunigenden Kräfte auf die Metallschmelze.)

Wollte man in dem Gußkanal von 3 mm Durchmesser eine wirkliche Rohrströmung erhalten, so müßte man die Tiegelöffnung auf mindestens 3 mm erweitern. (Das würde den obigen Versuchsbedingungen entsprechen). Aber damit ist dann auch die Wahrscheinlichkeit der turbulenten Strömungsform zu Beginn des Einfließens der Schmelze größer. Turbulente Verhältnisse dürften in der Regel bei größeren Güssen herrschen.

Eine Deutung der Kurven 4 und 35 (s. Abb. 9 und 11) im Vergleich ergibt gerade hierzu einen interessanten Aspekt.

Kurve 4, die aufgrund des Kontaktes der Elektroden (1) und (2) zustande gekommen ist, zeigt eine zusammenhängende, relativ gleichmäßige Kontaktperiode von nur kurzer Dauer.

Kurve 35 stellt dagegen einen sehr unregelmäßigen Verlauf der Kontaktkurve der Elektroden (1) - (2) - (3) über eine längere Dauer dar.

Die errechneten Reynoldsschen Zahlen für die mittlere Geschwindigkeit des gesamten Gußvorganges aus den Versuchen 4: $Re = 31300$ und 35: $Re = 9391$ stehen bei ähnlichen Metallmengen in einem Mißverhältnis.

Es ist "durchaus denkbar", daß dieses Mißverhältnis dadurch entstand, daß Versuch 4 laminar und Versuch 35 turbulent abgelaufen ist (WALDMANN 29).

Auch der unterschiedliche Kurvenverlauf deutet auf diese Möglichkeit, wobei auch noch die Tatsache ins Gewicht fällt, daß bei Versuch 4 die Meßelektroden nicht an der vorderen Kante des Gußkanals lagen, sondern 2 mm kanaleinwärts. Ihrer Lage nach müßten die Elektroden eine unregelmäßige Kurve erzeugen (s. Abb.8.), wenn das flüssige Metall nicht über die ganze Dauer des Versuchs mit den Elektroden Kontakt hätte.

Aus der Betrachtung des Bewegungsablaufes der Schleuder lassen sich noch folgende Tatsachen entnehmen:

Das flüssige Metall hat im Durchschnitt den Gußkanaleingang erreicht, wenn die Schleuder einen Winkel von 45° zurückgelegt hat. In diesem Stadium liegt der Pendelarm der Schleuder noch in seinem Ausgangswinkel, sodaß wir daraus ableiten können, daß das flüssige Metall nicht genau in der Richtung des Gußkanals beschleunigt wird, sondern, da das Ausschwenken des Pendelarmes erst nach einem zurückgelegten Winkel von ca 170° beginnt, stark gegen die Drehrichtung der Schleuder abgelenkt wird.

Der Gußvorgang dürfte in den meisten Fällen innerhalb der ersten Umdrehung der Schleuder ablaufen.

F ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von den Grundlagen der Hydrodynamik für die Rohrströmung wurde ein Überblick über die möglichen Strömungsverhältnisse im Gußkanal beim Schleuderguß gegeben. Unter diesen Gesichtspunkten wurden Versuche durchgeführt, wobei das flüssige Metall im Gußkanal die Elektroden eines elektrischen Schaltkreises überbrückte und die veränderte elektrische Spannung auf einem Oszillographen aufgezeichnet wurde.

Es ergaben sich Aussagen über die Geschwindigkeit des flüssigen Metalls im Gußkanal, die Rückschlüsse auf die Strömungsverhältnisse zuließen. Danach dürfte bei Gußkanälen von 3 mm Durchmesser ein turbulenter (oder ungeordneter) Metallstrom die Regel sein.

G SCHRIFTTUM

- (1) BLASIUS, H.: Mechanik. Dritter Teil: Kinematik, Dynamik, Hydraulik. 2.Aufl. Boysen & Maasch Verlag Hamburg 1944
- (2) D'ANS, J. und E. LAX: Taschenbuch für Chemiker und Physiker. 2.Aufl. Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1949
- (3) DEGUSSA Verkaufsstelle Nürnberg: briefl. Mitt. 1964
- (4) DRESNER, J.: Studien über Strömungsvorgänge in der Muffel beim zahnärztlichen Gußverfahren. Med. Diss. Erlangen 1949
- (5) ERK, S.: Entgegnung zu der Arbeit von M. Reiner: "Haftet eine Flüssigkeit an einer Wand, die sie nicht benetzt?" Z. Phys. 79, 141 (1932)
- (6) GEBHARDT, E. und G. WÖRWAG: Die innere Reibung flüssiger Legierungen aus Silber-Kupfer-Gold. . Z. Metallkde. 43, 106 (1952)
- (7) GMELIN, L.: Handbuch der anorganischen Chemie. System Nr.34, Teil A, Lieferung 1, S.253, hg: begonnen von R.J.Meyer, fortgeführt von E.H. Erich Pietsch. 8.Aufl. Verlag Chemie GMBH Weinheim Bergstraße 1960
- (8) HERBERT, W.E. und A.R.F. THOMPSON: Research on Gold Casting. Proc.Roy.Soc.Med. 30, 245 (1937)
- (9) KRAUSE, W. und F. SAUERWALD: Über die Dichte des flüssigen Goldes und flüssiger Gold-Kupfer- und Silber-Kupfer-Legierungen. Z.f. anorg. u. allg. Chemie 181, 347 (1929)
- (10) KYSELOVA, J., KYSELA, B. und J. MARES: Der Einfluß der Gußapparate auf das Vorkommen der Defekte in Dentalgüssen. Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 69, 403 (1959)
- (11) MARX, H.: Über den Einfluß des Gußverfahrens auf die Poren- und Lunkerbildung. Dtsch. zahnärztl. Z. 22, 1228 (1967)
- (12) MYERS, R.E.: Time required to cast gold by centrifugal force. J. Amer. dent. Ass. 28, 2001 (1941)

- (13) MYERS, R.E. und K.R. PFEIFFER: Effect of varying conditions on the time required to cast gold under air pressure. J.Amer.dent.Ass. 27, 530 (1940)
- (14) OEHRLEIN, D.: Die physikalischen Gesetze beim Gußverfahren. Zahnärztl.Rdsch. 33, 504 (1924)
- (15) OESCHGER, H.: Vergleichende Untersuchungen über das Einbetten mit im Vakuum von Luftblasen befreiter Einbettmasse. Dtsch. Zahn-, Mund- u. Kieferheilk. 22, 208 (1955)
- (16) PRANDTL, L.: Strömungslehre. Friedrich Vieweg & Sohn Braunschweig 1949
- (17) RÖDEL, H.: Mechanik für Ingenieure. Bd. 5: Hydro-mechanik. Georg Westermann Verlag 1953
- (18) ROEMPP, H.: Chemie Lexikon. Franckh'sche Verlags-handlung Stuttgart 1966
- (19) ROTTA, J.: Experimenteller Beitrag zur Entstehung turbulenter Strömung im Rohr. Ing.- Arch. 24, 258 (1956)
- (20) SCHLICHTING, H.: Über die Theorie der Turbulenzentstehung. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens 16, 65 (1949/50)
- (21) SCHLICHTING, H.: Entstehung der Turbulenz. Handbuch der Physik VIII, 1, Strömungsmechanik S. 353 hg. Flügge, S., Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1959
- (22) SCHOENBECK, F.: Die Porenbildung beim Goldguß. Z.f. Materialkde. u. Metallurgie 4, 109 (1929).
- (23) SOUDER, W.: Time required to cast dental restorations from molten alloy. J.Amer.dent.Ass. 20, 1010 (1933)
- (24) TAGGART, zitiert bei OESCHGER, H. (15)
- (25) VACHUDA, J.: Das Großgußverfahren für die Zahnpro-thetik. Z.f. Zahntechnik u. Zahnheilk. 36, 13.Forts. (1934)
- (26) VOSS, R.: Zu speziellen Fragen der Gußtechnik. Dtsch. zahnärztl. Z. 22, 1220 (1967)
- (27) VOSS, R. persönliche Mitteilung
- (28) WALDMANN, L. persönliche Mitteilung
- (29) WETTERER, E. persönliche Mitteilung

- (30) WILLE, R.: Modellvorstellungen zum Übergang laminar-turbulent. Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein - Westfalen H. 72, S. 7.
Westdeutscher Verlag Köln - Opladen 1960
- (31) WINDECKER, D. und W. HERMANN: Der Modell - Einstückguß in der Röntgenanalyse. Dtsch. zahnärztl. Z. 22, 1244 (1967)

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. E. Wetterer, Vorstand des II. Physiologischen Institutes der Universität Erlangen-Nürnberg, sowie Herrn Prof. Dr. L. Waldmann, Mitvorstand des Institutes für Theoretische Physik der Universität Erlangen-Nürnberg, für die Unterstützung bei der Klärung einiger spezieller physikalischer Fragen.

Zu großem Dank bin ich Herrn Priv. Doz. Dr. L. Kobes verpflichtet. Er hat mir das Thema der Arbeit überlassen und den Gang der Untersuchungen durch reiche Unterstützung und wertvolle Anregungen in hohem Maße gefördert.

LEBENS LAUF

Am 19. Februar 1940 wurde ich als Sohn des Zahnarztes August R. Strauß und seiner Ehefrau Gertrud in Karlsruhe geboren.

Grundschule und Gymnasium besuchte ich in Ulm, wo ich im März 1959 am Kepler-Gymnasium die Reifeprüfung ablegte.

Nach je drei vorklinischen Semestern an der Universität München und der Freien Universität Berlin, belegte ich das klinische Studium wieder mit je drei Semestern in Tübingen und in Erlangen, wo ich am 13. August 1965 das zahnärztliche Staatsexamen bestand.

Nach einigen Monaten zahnärztlicher Vertretungstätigkeit und anschließendem Wehrdienst als Truppenzahnarzt kehrte ich nach Erlangen an die vorliegende Arbeit zurück.

Offsetdruck - Fotodruck

Josef Hogl

8520 Erlangen, Hauptstr. 109, (Nähe Martin-Luther-Platz,) Tel. 22990

Offsetdruck-Fotodruck

J. Hogl, 852 Erlangen, Hauptstr. 109, (Nähe Martin-Luther-Platz) Tel. 22990
